

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL AGUA BAJO EL MODELO DE PERFIL DE INFILTRACIÓN UTILIZANDO EL MÉTODO DIFERENCIAS FINITAS

EXAMINE THE BEHAVIOR OF WATER UNDER THE INFILTRATION PROFILE MODEL USING THE FINITE DIFFERENCE METHOD

Víctor Rogelio Tirado Picado*
victor.tirado@uam.edu.ni
<https://orcid.org/0000-0002-7907-0006> 
Universidad Americana, UAM

Recibido: 29 febrero 2024
Aceptado: 25 marzo 2025

*Doctor en Ciencias. Posdoctorado en: Science and Engineering/ Climate Change in Engineering Management by Atlantic International University, Honolulu, Hawaii, US. Director de Investigación y Extensión Universitaria en Universidad Americana, UAM.

Resumen

El presente trabajo se delimitó a examinar el comportamiento del agua bajo los modelos de perfil de infiltración. Para lograr lo anterior, se prosiguió a conceptualizar los diferentes métodos de infiltración, luego, desarrolló el método de diferencias finitas para obtener el gráfico de comportamiento, y finalmente se valoró la importancia y facilidad de implementar este nuevo método de examinar. Se configuró la malla de diferencias finitas de la siguiente manera, en la parte superior se colocó el tiempo de 0 a 420 minutos, en la parte inferior se colocó el tiempo en cero, en los extremos derecha e izquierda, se colocó el resultado de la infiltración en mm/h. De acuerdo con el Método de Diferencias Finitas se manifiesta una similitud del comportamiento de la infiltración del agua en el suelo, los resultados de este ensayo se obtuvieron en un suelo con textura franco-arcillosa, perteneciente al grupo hidrológico C, clasificado como suelo aluvial poco diferenciado, del orden Molisol. La importancia de este método, proporciona una herramienta muy poderosa para el tratamiento de los datos, este método se puede estudiar para otros ensayos en la cual se ha determinado la capacidad de infiltración por diferentes métodos, siguiendo esta metodología.

Palabras clave: Diferencias finitas, curva de infiltración, doble anillo, suelo, modelo.

Abstract

This study was limited to examining the behavior of water through infiltration profile models. To achieve this, the various infiltration methods were first conceptualized, then the finite difference method was developed to generate the behavior graph, and finally, the importance and ease of implementing this new examination method were assessed. The finite difference grid was configured as follows: at the top, time was set from 0 to 420 minutes; at the bottom, time was set to zero; and on the right and left sides, the infiltration results in mm/h were placed. According to the Finite Difference Method, a similarity in the infiltration behavior of water in the soil is observed. The results of this test were obtained in a loam-clay textured soil, classified under Hydrologic Soil Group C, characterized as weakly differentiated alluvial soil, and taxonomically belonging to the Mollisol order. The significance of this method lies in its potential as a powerful tool for data processing. It may also be applied to other tests in which infiltration capacity is determined by different methods, following the same methodology.

Keywords: Finite differences, infiltration curve, double ring, soil, model.

1. Introducción

Datos de Alvarado et al., (2014) manifiestan que antes de que se escribiera la historia a partir de la conquista y colonización de Costa Rica, los grupos indígenas regionales y de culturas mesoamericanas o colombianas ya conocían, a su práctico entender, las propiedades de las diferentes arcillas con que se fabricaron los instrumentos y cerámica utilitaria y ceremonial.

Desde la conquista hasta la actualidad han sido reconocidas las propiedades de las arcillas en la fabricación de tejas, ladrillos y útiles de cerámicas para el uso cotidiano y ornamental, continuando con los autores, también manifiestan que los sitios y procedimiento aún se retienen en lugares como Aguacaliente de Cartago, Guatíl en Guanacaste y la Uruca en San José, donde aún se hace uso de estos materiales, presentes en todas las etapas de la evolución de la humanidad y aún en sus exploraciones.

Junto a lo que mencionan Karlin et al. (2019), la presión de uso del suelo en el centro de Argentina ha aumentado en las últimas cinco décadas debido a la habilitación de tierras para usos agropecuarios, industriales y habitacionales.

Tanto Karlin et al. (2019) como Bernasconi et al. (2015) manifiestan que estos cambios, junto con disturbios antrópicos tales como los incendios forestales periódicos y la invasión de especies exóticas, son algunos de los principales procesos de degradación que afectan las características edáficas e hidrológicas de estos suelos, alterando los ciclos hidrogeoquímicos de la cuenca.

Unificando los criterios de Karlin et al. (2019) y Alvarado et al. (2014), se puede concluir que la historia del uso del suelo a lo largo del tiempo y su estudio de acuerdo al uso no solo debe contemplar los suelos de la región

centroamericana, sino también los suelos de la región latinoamericana, mesoamericana y los países hispanoamericanos. Estos estudios deben ser continuos, ya que el cambio en el uso del suelo ha sido muy dinámico y su tendencia al cambio crece de manera exponencial.

En tal sentido, una manera de estudiar las texturas de los suelos ha sido por medio de diversos métodos que determinan la infiltración del agua en el suelo. Como lo dicta Landini et al. (2007), la infiltración del agua en el suelo y su movimiento en la zona no saturada del mismo es de fundamental importancia en la actividad agropecuaria. El proceso de infiltración, de acuerdo con Landini et al. (2007) y Narro Faría (1994), influye en el intercambio de agua entre el sustrato y las plantas y se ve afectado por las labores realizadas en el suelo.

Landini et al. (2007) describe que la infiltración, como un componente del ciclo hidrológico, está relacionada con el escurrimiento superficial. Por parte de él, está en lo cierto, pero también Landini et al. (2007) expresa que se puede producir erosión y con la recarga de los acuíferos y su vulnerabilidad a la contaminación. Por lo tanto, es de suma importancia su evaluación para un manejo sustentable de las tierras que procure evitar la degradación.

La determinación de los parámetros hidráulicos en la zona no saturada, tales como la sortividad y la conductividad hidráulica, constituye el primer paso para poder utilizar modelos hidrológicos que puedan predecir el movimiento del agua. El estudio del comportamiento del agua en el suelo constituye una investigación que debe realizarse de manera continua. El suelo está en constante cambio dinámico debido a diversas razones, principalmente por las actividades antropogénicas. La clasificación de la textura del suelo resulta fundamental,

ya que permite identificar la mejor manera de aprovechar una determinada área y conservar otras.

Examinar el comportamiento del agua bajo modelos de perfil de infiltración resulta novedoso cuando se implementa el método de diferencias finitas. Este método permite visualizar de manera gráfica, en tres dimensiones, el proceso de infiltración en el punto donde se realiza un ensayo, proporcionando una representación esquemática del fenómeno. Para lograr este objetivo, se pretende conceptualizar los diferentes métodos de infiltración, desarrollar el método de diferencias finitas para obtener un gráfico del comportamiento del agua y, finalmente, valorar la importancia y facilidad de implementar este nuevo enfoque.

La hipótesis principal a comprobar es si el comportamiento del agua en el suelo, visualizado de manera gráfica mediante el método de diferencias finitas, presenta similitudes con los resultados obtenidos a través de otros métodos gráficos. En esta parte del trabajo, se hará referencia únicamente a los métodos de infiltración más utilizados y se describirá la teoría del método de diferencias finitas.

De acuerdo con Blanco Sepúlveda (2015), en su resumen destaca uno de los métodos para determinar la infiltración del suelo y resalta la importancia de los estudios de infiltración por su aplicabilidad en valoraciones medioambientales y en proyectos de transformación de secano a regadío. Blanco Sepúlveda (2015) señala que existen numerosos métodos para calcular la capacidad de infiltración de un suelo, seleccionando el infiltrometro de cilindro simple por su simplicidad, bajo costo y facilidad de manejo.

Por otro lado, Batres y Barahona-Palomo (2017) destacan tres métodos, entre

los cuales sobresale el método del permeámetro de Guelph, una modificación del permeámetro presentado por Talsma y Hallam (1980). Según Batres y Barahona-Palomo (2017), este permeámetro consiste en un dispositivo Mariotte construido con dos tubos intrínsecos que actúan como depósito, manteniendo una carga hidráulica constante en un hoyo practicado en el suelo. Este método permite determinar la conductividad hidráulica saturada en campo mediante un procedimiento numérico basado en mediciones de velocidad de flujo en estado estacionario.

Los modelos analíticos que representan el flujo a través de un pozo o agujero de infiltración en régimen permanente, desde un pozo de radio "a" y altura de agua constante "H", en un medio poroso, rígido, semi-infinito, homogéneo e isotrópico, se deducen a partir de la ley de Darcy, ya sea en un suelo totalmente saturado o no, considerando distintos tipos de flujo.

Batres y Barahona-Palomo (2017) también describen el método del doble anillo, que, según Selker et al. (1999), es la prueba más común para estimar las propiedades hidráulicas del suelo. Horton (1939) estableció una relación empírica para representar el declive de la infiltración respecto al tiempo en suelos sometidos a una precipitación con intensidad superior a la capacidad de infiltración.

Finalmente, Batres y Barahona-Palomo (2017) presentan el método de Porchet como el tercer enfoque para determinar la capacidad de infiltración. Este método consiste en un agujero cilíndrico excavado en el suelo, con radio y profundidad constantes, en el cual se mide el descenso del nivel del agua a lo largo del tiempo. Una vez alcanzada la saturación del terreno adyacente al pozo, la velocidad de infiltración se mantiene casi constante. Para el análisis de la capacidad de infiltración, se

aplica la ley de Darcy. El presente trabajo de investigación busca aportar al conocimiento sobre la interpretación del comportamiento del flujo a través del suelo, resultado de pruebas de infiltración.

1.1 Método de Diferencia Finitas

Es importante definir el método de diferencias finitas (MDF). Según Lara Romero et al. (2019), este método es de carácter general y permite la resolución aproximada de ecuaciones diferenciales definidas en dominios finitos. Probablemente, es uno de los primeros métodos numéricos utilizados en la resolución de problemas relacionados con dinámica de fluidos, transferencia de calor y problemas electromagnéticos. Además, Lara Romero et al. (2019) mencionan que existen documentos que sugieren que Gauss utilizó este método. En correspondencia con Chapra y Canale (2011), de Greiff Bravo (1955) desarrolló procedimientos polinómicos utilizando el método de diferencias finitas.

Por su parte, Martínez (1995) presentó un estudio de esquemas en diferencias finitas para la resolución numérica de sistemas hiperbólicos de leyes de conservación, aplicados al caso de las ecuaciones que gobiernan el flujo en conductos de admisión y escape de motores. Martínez (1995) también dedujo el rango de variación de los parámetros que intervienen en las técnicas de corrección de flujos para que estas verifiquen la propiedad TVD (Total Variation Diminishing). ChaprayCanale(2011) plantean que las soluciones numéricas de la ecuación de Laplace generan sistemas mucho más grandes de lo habitual. Por ejemplo, para una malla de 10 x 10, se obtienen 100 ecuaciones algebraicas lineales. Estos autores describen que el método de aproximación representa un procedimiento eficiente para obtener soluciones de ecuaciones diferenciales elípticas.

Esta técnica se expresa mediante la siguiente ecuación: **Ecuación 1**

$$T_{ij} = \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1}}{4}$$

Se resuelve de manera interactiva para $j=1$ hasta n e $i=1$ hasta m . Como dicta una ecuación diagonal a partir de la construcción de la matriz, el procedimiento al final convergerá a una solución estable. Algunas veces se utiliza la sobrerrelajación para acelerar la velocidad de la convergencia, aplicando la siguiente ecuación 2 después de cada interacción.

Ecuación 2

$$T_{i,j}^{nuevo} = \lambda T_{i,j}^{nuevo} + (1 - \lambda) T_{i,j}^{anterior}$$

Donde $T_{i,j}^{nuevo}$ y $T_{i,j}^{anterior}$ son los valores de $T_{i,j}$ de la actual interacción y de la previa respectivamente: λ es un factor de ponderación que está entre 1 y 2.

Como el método convencional de Gauss-Seidel, las iteraciones se repiten hasta que los valores absolutos de todos los errores relativos porcentuales $(\epsilon_a)_{i,j}$ están por debajo de un criterio preespecificado de terminación. Dichos errores relativos porcentuales se estiman mediante la siguiente ecuación 3:

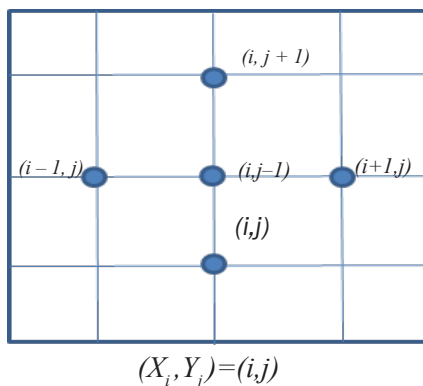
Ecuación 3

$$|(\epsilon_a)_{i,j}| = \left| \frac{T_{i,j}^{nuevo} - T_{i,j}^{anterior}}{T_{i,j}^{nuevo}} \right| * 100\%$$

A continuación, se presenta un ejemplo de malla bidimensional organizada para implementar el método de diferencia finita, ver figura 1.

Figura 1

Representación gráfica de una malla bidimensional



Nota. Fuente: (Chapra & Canale, 2011)

2. Método

2.1 Tipo de investigación

El presente trabajo está diseñado bajo el planteamiento metodológico del enfoque cuantitativo, puesto que este es el que mejor se adapta a las características y necesidades de la presente investigación.

El enfoque cuantitativo utiliza recolección y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis establecida previamente, y se traduce en:

... lo secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no podemos "brincar" o eludir pasos. El orden es riguroso, aunque desde luego, podemos redefinir alguna fase. Parte de una idea que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construyen un marco o una perspectiva teórica. De las preguntas se establecen hipótesis y determinan variables; se traza un plan para probarlas (diseño); se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas utilizando métodos estadísticos, y se extrae una serie de conclusiones respecto de la o las hipótesis. (Sampieri, Fernández Collado, & Baptista, 2014. p. 5)

Del enfoque cuantitativo se toma la técnica de la observación, se recolecta la información a partir de ensayos y se pueden cuantificar. La recolección de datos se realiza a través de la observación cuantitativa, ya que permite cuantificar el comportamiento de la infiltración en el tiempo.

2.2 Tiempo de Ejecución

En el desarrollo del trabajo de investigación, se realizará en un mes, de los cuales una semana para obtener los datos de infiltración para una duración de 420 minutos de ensayo, una semana para procesar los datos de infiltración, y dos semanas para redactar el informe final, en el periodo de junio a julio del 2023.

2.3 Técnica y método de recolección de datos

Para la recolección de datos se implementó el método de infiltración de doble anillo, aplicado durante un periodo de 420 minutos (equivalente a 7 horas). Los datos obtenidos se procesaron y visualizaron mediante herramientas de Microsoft Excel, dada su versatilidad y compatibilidad con los procedimientos requeridos en el estudio. El estudio se realizó en suelos con textura franco-arcillosa, pertenecientes al grupo hidrológico C, clasificados como suelos aluviales poco diferenciados y taxonómicamente incluidos en el orden Molisol.

■ Fuentes Primarias

- Datos del ensayo de infiltración realizado in situ.
- Artículos científicos que documentan la aplicación del método de diferencias finitas.
- Portal web, donde se valore la importación del método de infiltración.
- Portales web especializados que analizan la importancia de los métodos de infiltración y del método de diferencias finitas.

■ Fuentes Secundarias

- Bibliografía técnica sobre el método de infiltración de doble anillo.

—Referencias teóricas sobre el método de diferencias finitas.

■ Universo

—Datos de ensayos de prueba de infiltración.

■ Población

—Datos de ensayos de prueba de infiltración caso de estudio Nicaragua Machinery Company, Managua, Nicaragua.

2.3.1 Muestra

—La muestra estuvo compuesta por los datos registrados durante una sesión de 420 minutos de infiltración continua en el sitio previamente mencionado.

2.3.2 Criterio de Inclusión

—Ensayos de infiltración realizados con el método de doble anillo, en un tiempo de 7 horas equivalente a 420 minutos.

■ Criterio de Exclusión:

—Aquellos ensayos de infiltración que son realizados con otro método para determinar la capacidad de infiltración.

3. Resultados

El análisis de resultados se basó en los datos obtenidos a través del ensayo de infiltración por el método de doble anillo. En la primera etapa, se calcularon los valores de infiltración en mm/h (ver Tabla 1).

A partir de estos datos, se construyó una malla bidimensional, configurada de la siguiente manera:

En la parte superior, el eje del tiempo se representó de 0 a 420 minutos.

En la parte inferior, se mantuvo constante el valor de tiempo igual a 0 minutos.

En los extremos izquierdo y derecho, se ubicaron los valores de capacidad de infiltración en mm/h, ordenados de mayor a menor (ver Tabla 2, pág. 8).

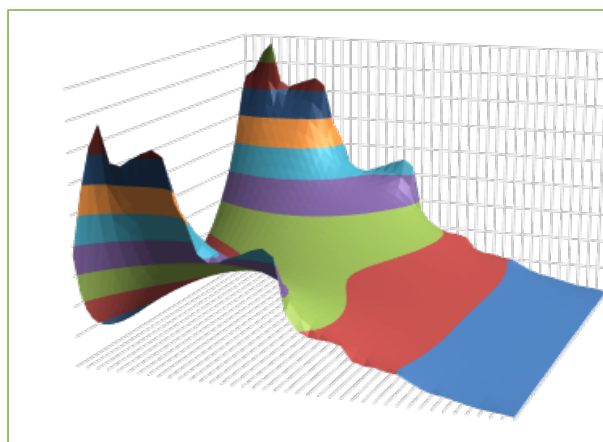
Una vez definido el arreglo y configurado la malla, se procedió a realizar el proceso interactivo del método de diferencias finitas implementando la expresión 1, dando como resultado la tabla 3, en anexo.

Los resultados permitieron visualizar gráficamente el comportamiento de la infiltración: a) el color verde indica una profundidad superficial de infiltración; b) el color amarillo, una profundidad media; c) el color rojo, una mayor profundidad, donde el agua alcanza zonas más profundas del suelo.

En la Figura 2 se presenta el perfil gráfico del comportamiento del agua en el suelo, y en la Figura 3 se muestra la curva de velocidad de infiltración, que evidencia el patrón dinámico del proceso. la curva de velocidad de infiltración que se estudió.

Figura 2

Comportamiento del flujo de agua en el suelo, ubicación Nicaragua Machinery Company



Nota. La gráfica es construida a partir de los resultados de la tabla 3, modelado en 3D.

Tabla 1

Datos obtenidos del ensayo de infiltración.

Hora	Intervalos	T. Acum. (min)	Lectura (cm)	R	ln 2h1+R	Infiltración mm/h	Observación
				2(t2-t1)	2h2+R		
08:00	0	0	24.00				
08:01	1	1	20.50	7.50	0.07	332.93	
08:02	1	2	15.50	7.50	0.09	393.78	
08:03	1	3	10.20	7.50	0.11	486.69	
08:04	1	4	6.00	7.50	0.13	594.45	
08:05	1	5	21.50	7.50	0.07	321.45	Rellenado
08:06	1	6	18.45	7.50	0.08	352.06	
08:07	1	7	16.20	7.50	0.09	388.70	
08:08	1	8	14.10	7.50	0.09	401.94	
08:09	1	9	12.00	7.50	0.10	434.52	
08:10	1	10	10.10	7.50	0.10	468.35	
08:12	2	12	8.05	3.75	0.11	257.63	
08:14	2	14	6.00	3.75	0.13	286.43	
08:16	2	16	21.60	3.75	0.07	160.17	Rellenado
08:18	2	18	19.00	3.75	0.08	172.52	
08:20	2	20	16.40	3.75	0.08	186.89	
08:22	2	22	13.80	3.75	0.10	216.25	
08:24	2	24	11.50	3.75	0.10	222.15	
08:26	2	26	9.20	3.75	0.11	245.05	
08:28	2	28	6.90	3.75	0.12	274.11	
08:30	2	30	6.90	3.75	0.14	323.68	Rellenado
08:35	5	35	21.30	1.50	0.06	52.51	
08:40	5	40	18.60	1.50	0.08	69.89	
08:45	5	45	15.90	1.50	0.08	76.06	
08:50	5	50	13.20	1.50	0.09	83.61	
08:55	5	55	10.50	1.50	0.10	93.08	
09:00	5	60	7.80	1.50	0.12	105.40	
09:10	10	70	17.50	0.75	0.08	37.29	Rellenado
09:20	10	80	11.80	0.75	0.10	45.61	
09:30	10	90	6.50	0.75	0.13	58.71	
09:40	10	100	12.30	0.75	0.10	46.53	Rellenado
09:50	10	110	8.20	0.75	0.13	58.68	
10:00	10	120	16.40	0.75	0.09	38.55	Rellenado
10:20	20	140	10.00	0.38	0.11	24.86	
10:40	20	160	16.80	0.38	0.08	18.96	Rellenado
11:00	20	180	11.50	0.38	0.10	23.00	
11:30	30	210	8.20	0.25	0.12	17.38	Rellenado
12:00	30	240	16.90	0.25	0.08	12.59	
13:00	60	300	13.20	0.13	0.09	7.04	
14:00	60	360	10.05	0.13	0.11	7.96	
15:00	60	420	7.20	0.13	0.12	9.08	
Valor de infiltración						24.05	

Nota. La prueba se realizó en instalaciones de Nicaragua Machinery Company, en Managua, Nicaragua

Tabla 2

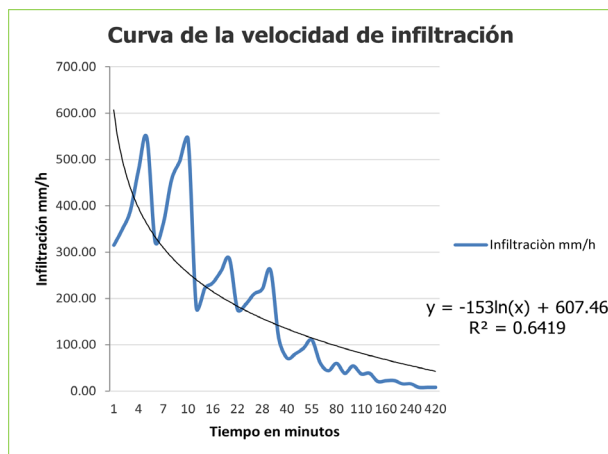
Arreglo para configurar la malla

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	
332.9	184.9	119.9	85.7	65.6	52.7	44.2	38.3	34.3	31.5	29.6	28.5	28.2	28.5	29.2	30.2	31.4	32.8	332.9
393.8	286.8	207.9	155.5	120.7	97.2	80.7	68.9	60.3	54.0	49.3	46.1	43.9	42.6	42.1	42.1	42.5	43.5	393.8
486.7	360.5	269.5	207.5	164.8	134.5	112.6	96.3	84.0	74.8	67.8	62.5	58.7	56.1	54.4	53.5	53.2	53.6	486.7
594.5	398.9	302.1	240.3	196.3	163.6	138.7	119.6	104.8	93.3	84.4	77.6	72.4	68.6	65.9	64.2	63.3	63.2	594.5
321.5	338.8	299.6	255.3	216.6	184.7	159.1	138.6	122.3	109.3	99.0	91.0	84.7	79.9	76.4	74.1	72.6	72.1	321.5
352.1	335.1	302.1	264.9	230.0	199.7	174.4	153.5	136.4	122.6	111.5	102.5	95.5	90.0	85.9	83.0	81.1	80.2	352.1
388.7	347.4	308.8	272.0	238.8	209.8	185.1	164.5	147.4	133.2	121.6	112.2	104.7	98.7	94.2	90.8	88.6	87.3	388.7
401.9	356.9	313.7	275.8	243.2	215.5	191.9	172.0	155.3	141.3	129.6	120.1	112.3	106.1	101.2	97.6	95.1	93.6	401.9
434.5	364.7	313.2	274.2	242.9	217.0	195.0	176.3	160.4	147.0	135.6	126.1	118.3	112.0	107.0	103.2	100.5	98.8	434.5
468.4	354.2	300.1	264.8	237.4	214.5	194.9	177.9	163.2	150.5	139.7	130.5	122.9	116.6	111.6	107.8	105.0	103.2	468.4
257.6	283.7	268.3	247.4	227.3	208.8	192.1	177.2	163.9	152.2	142.1	133.4	126.1	120.0	115.1	111.3	108.4	106.5	257.6
286.4	254.6	242.0	229.4	215.5	201.4	187.6	174.7	163.0	152.4	143.1	135.0	128.0	122.2	117.5	113.7	110.9	109.0	286.4
160.2	206.2	215.7	212.5	204.1	193.5	182.2	171.2	160.9	151.4	142.8	135.3	128.9	123.4	118.9	115.3	112.5	110.7	160.2
172.5	194.3	202.2	200.9	194.8	186.2	176.7	167.1	157.9	149.3	141.6	134.7	128.7	123.6	119.3	115.9	113.3	111.5	172.5
186.9	196.1	197.8	194.3	187.9	179.8	171.2	162.5	154.2	146.5	139.5	133.2	127.6	122.9	118.9	115.7	113.3	111.5	186.9
216.3	205.7	198.4	190.8	182.5	174.1	165.7	157.6	150.0	143.0	136.6	130.8	125.8	121.5	117.8	114.8	112.6	110.9	216.3
222.2	211.9	199.4	187.8	177.5	168.3	159.9	152.2	145.2	138.8	133.0	127.8	123.3	119.3	116.0	113.3	111.2	109.6	222.2
245.1	220.5	199.4	183.4	171.3	161.6	153.4	146.2	139.8	134.1	128.9	124.2	120.1	116.6	113.6	111.1	109.2	107.8	245.1
274.1	225.6	194.3	175.3	162.7	153.4	145.9	139.5	133.8	128.7	124.2	120.1	116.5	113.3	110.6	108.4	106.7	105.4	274.1
323.7	213.3	177.1	160.7	150.7	143.4	137.3	132.0	127.2	122.9	119.0	115.4	112.3	109.5	107.2	105.2	103.7	102.6	323.7
52.5	126.9	140.1	139.7	136.2	132.1	127.9	123.9	120.2	116.7	113.4	110.4	107.8	105.4	103.4	101.7	100.3	99.3	52.5
69.9	101.6	116.7	121.8	122.3	120.8	118.4	115.7	112.9	110.2	107.6	105.1	102.9	100.9	99.2	97.7	96.6	95.7	69.9
76.1	92.8	103.4	108.6	110.4	110.3	109.2	107.5	105.6	103.6	101.5	99.6	97.8	96.2	94.7	93.5	92.5	91.8	76.1
83.6	90.3	95.3	98.7	100.4	100.9	100.5	99.6	98.4	96.9	95.4	93.9	92.5	91.2	90.1	89.1	88.3	87.7	83.6
93.1	89.2	89.1	90.4	91.6	92.3	92.4	92.0	91.3	90.4	89.3	88.2	87.2	86.1	85.2	84.4	83.8	83.3	93.1
105.4	84.5	81.4	82.2	83.4	84.3	84.8	84.8	84.5	83.9	83.3	82.5	81.7	81.0	80.3	79.6	79.1	78.8	105.4
37.3	62.1	69.9	73.4	75.5	76.8	77.5	77.9	77.7	77.3	76.8	76.3	75.7	75.2	74.7	74.4	74.1	74.1	37.3
45.6	56.7	62.7	66.2	68.4	69.8	70.7	71.3	71.5	71.6	71.4	71.1	70.8	70.4	70.1	69.8	69.5	69.3	45.6
58.7	56.2	58.1	60.2	62.0	63.3	64.3	65.0	65.4	65.6	65.6	65.6	65.4	65.2	65.0	64.7	64.6	64.4	58.7
46.5	51.4	53.1	54.6	56.0	57.3	58.2	59.0	59.5	59.8	60.0	60.0	60.0	59.9	59.8	59.7	59.6	59.5	46.5
58.7	49.7	48.4	49.1	50.3	51.4	52.4	53.2	53.8	54.2	54.5	54.6	54.7	54.7	54.7	54.6	54.6	54.6	58.7
38.6	40.4	41.7	43.1	44.5	45.7	46.7	47.6	48.2	48.7	49.1	49.3	49.4	49.5	49.6	49.6	49.6	49.6	38.6
24.9	31.5	35.0	37.2	38.9	40.2	41.3	42.2	42.8	43.4	43.8	44.0	44.2	44.4	44.5	44.5	44.6	44.6	24.9
19.0	25.8	29.4	31.8	33.6	34.9	36.0	36.9	37.6	38.2	38.6	38.9	39.1	39.3	39.4	39.5	39.5	39.6	19.0
23.0	23.3	25.2	27.1	28.7	30.0	31.0	31.9	32.5	33.1	33.5	33.8	34.1	34.2	34.4	34.5	34.6	34.6	23.0
17.4	19.1	20.9	22.6	24.1	25.2	26.2	27.0	27.6	28.1	28.5	28.8	29.1	29.2	29.4	29.5	29.6	29.6	17.4
12.6	14.9	16.9	18.4	19.7	20.7	21.6	22.3	22.8	23.3	23.6	23.9	24.1	24.3	24.4	24.5	24.6	24.7	12.6
7.0	11.1	13.1	14.5	15.6	16.4	17.1	17.7	18.1	18.5	18.8	19.0	19.2	19.4	19.5	19.6	19.7	19.7	7.0
8.0	9.2	10.1	10.9	11.6	12.2	12.7	13.2	13.5	13.8	14.1	14.2	14.4	14.5	14.6	14.7	14.7	14.8	8.0
9.1	7.6	7.3	7.5	7.8	8.1	8.5	8.7	9.0	9.2	9.3	9.5	9.6	9.7	9.7	9.8	9.8	9.8	9.1
7.2	4.7	3.9	3.8	3.9	4.1	4.2	4.4	4.5	4.6	4.7	4.7	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9	4.9	7.2
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Nota. En la parte superior se coloca el tiempo de 0 a 22 minutos, en la parte inferior se coloca el tiempo en cero, en los extremos derecha e izquierda, se coloca el resultado de la infiltración en mm/h.

Figura 3

Curva de comportamiento de la velocidad de infiltración



Nota. Resultado de la velocidad de infiltración en mm/h

De acuerdo a la figura 2 y 3 se puede manifestar una similitud del comportamiento de la infiltración del agua en el suelo, los resultados de este ensayo es un suelo franco arenoso. Ver figura 3.

3. Discusión

El estudio se realiza en suelos con textura franco-arenoso, pertenece al grupo hidrológico de suelo C, son suelos aluviales poco diferenciados, con taxonomía del orden Molisol.

De manera general se examinó el comportamiento del agua bajo el suelo con textura franco-arcilloso, del grupo hidrológico de suelo C, aluviales poco diferenciados, con taxonomía del orden molisol, implementando el método de diferencias finitas, dando como resultado una gráfica en tres dimensiones.

Se adoptó el método de doble anillo para realizar el ensayo de infiltración, ya que este es un método bien versátil, ágil y menos costoso, en relación al Método del permeámetro de Guelph, y Método de Porchet.

Con los datos que se obtuvieron se logró configurar los datos generando de la malla, el orden de la malla se arregla de la siguiente manera, en la parte superior el tiempo en que se realizó el ensayo de infiltración que va de 0 minutos a 420 minutos, en la parte inferior se configura con el tiempo igual a 0 minutos; en los extremos derecha a izquierda se coloca el resultado de la capacidad de infiltración en mm/h ordenado de mayor a menor.

La importancia de este método, nos proporciona una herramienta muy poderosa para el tratamiento de los datos, este método se puede estudiar para otros ensayos en la cual se ha determinado la capacidad de infiltración por diferentes métodos, siguiendo esta metodología.

Según el comportamiento del agua en el suelo, se puede visualizar de manera gráfica la similitud del comportamiento de la curva de infiltración, para profundizar en el estudio del perfil de la infiltración en el suelo, se deja abierto realizar el modelo con otros métodos para determinar la infiltración y con otros resultados.

4. Conclusiones

El estudio permitió analizar el comportamiento del agua en un suelo con características franco-arcilloso, aluvial poco diferenciado y clasificado taxonómicamente como Molisol, utilizando el método de diferencias finitas para modelar la infiltración. La aplicación del método del doble anillo demostró ser una alternativa eficaz, ágil y de bajo costo en comparación con otros métodos como el de Guelph y Porchet, facilitando la recolección

de datos para la simulación numérica. Los resultados obtenidos reflejan una coherencia en la forma de la curva de infiltración, evidenciando el potencial del modelo tridimensional generado. Este enfoque no solo aporta una herramienta robusta para el análisis de infiltración en suelos, sino que también abre la posibilidad de aplicar esta metodología a diferentes tipos de suelos y métodos de infiltración, contribuyendo al fortalecimiento de estudios hidrológicos más precisos y replicables.

5. Agradecimiento

En primer lugar, a Dios, nuestro padre, que me ha dado una mano para seguir por el buen camino y alcanzar mis metas. A la Universidad Americana (UAM) y la Dirección de Investigación y Extensión Universitaria (DIE), por abrirme las puertas del conocimiento en esta nueva etapa de mi vida.

6. Referencias

- Alvarado, A., Mata, R., & Chinchilla, M. (2014). Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el periodo 1931-2014: I. Historia metodológica de análisis y mineralogía de arcillas en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agronomía Costarricense*, 75-106.
- Batres, C., & Barahona-Palomo, M. (2017). Comparación de tres métodos de infiltración utilizados para el cálculo del balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *UNED Research Journal*, 23-33.
- Blanco Sepúlveda, R. (2015). El infiltrómetro de cilindro simple como método de cálculo de la continuidad hidráulica de los suelos. Experiencias de campo en ámbitos de montaña mediterránea. *BAETICA. Estudios De Historia Moderna Y Contemporanea*, 9-33.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2011). *Métodos numéricos para ingenieros*. México D.F.:

McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.

- De Greiff Bravo, L. (1955). Aplicación de la teoría de diferencias finitas al cálculo de polinomios. *Revista Colombiana de Matemáticas*, 1-12.
- Karlin, M., Salazar, J., Corea, A., Sanchez, S., Arnulphi, S., & Accietto, R. (2019). Cambios en el uso del suelo: capacidad de infiltración en el centro de Córdoba (Argentina). *Ciencia del Suelo*, 196-208.
- Landini, A., Martinez, D., Dias, H., Soza, E., Agnes, D., & Sainato, C. (2007). Modelos de infiltración y funciones de pedatransferencia aplicados a suelos de distintas texturas. *Ciencia del suelo*, 123-131.
- Lara Romero, L., Chávez Aliaga, Z., & Castañeda Vergara, J. (2019). *El método de diferencias finitas. Teoría y Práctica*. Trujillo-Perú: Imprenta Editorial Gráfica Real S.A.C.
- Martinez, M, L. (1995). *Estudio de esquemas en diferencias finitas para el cálculo del flujo comprensible unidimensional, no estacionario y no isentópico (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València)*.
- Sampieri, H., Fernández Collado, C., & Baptista, L. (2014). *Metodología de la Investigación*. México D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.

7. Anexo

Tabla 3

Resultado de la configuración de la malla, implementando el Método de Diferencias Finitas

	0	1	2	3	4	5	6	7	9	10	12	14	18	20	22	24	26
332.9	184.9	119.9	85.7	65.6	52.7	44.2	38.3	34.3	29.6	28.5	28.2	28.5	30.2	31.4	32.9	34.5	36.5
393.8	286.8	207.9	155.5	120.7	97.2	80.7	68.9	60.3	49.4	46.1	43.9	42.7	42.1	42.5	43.5	44.8	46.6
486.7	360.5	269.5	207.5	164.8	134.5	112.6	96.3	84.1	67.8	62.5	58.7	56.1	53.5	53.3	53.7	54.7	56.2
594.5	398.9	302.1	240.3	196.3	163.6	138.7	119.6	104.8	84.4	77.6	72.4	68.6	64.2	63.3	63.3	63.9	65.2
321.5	338.8	299.6	255.3	216.6	184.7	159.1	138.6	122.3	99.1	91.0	84.7	79.9	74.1	72.7	72.1	72.4	73.5
352.1	335.1	302.1	264.9	230.0	199.7	174.4	153.5	136.4	111.5	102.5	95.5	90.0	83.0	81.1	80.2	80.1	81.0
388.7	347.4	308.8	272.0	238.8	209.8	185.1	164.5	147.4	121.7	112.2	104.7	98.7	90.8	88.6	87.3	87.0	87.6
401.9	356.9	313.7	275.8	243.2	215.5	191.9	172.0	155.3	129.7	120.1	112.3	106.1	97.6	95.1	93.6	93.0	93.4
434.5	364.7	313.2	274.2	243.0	217.0	195.0	176.4	160.5	135.6	126.2	118.4	112.0	103.2	100.5	98.9	98.1	98.3
468.4	354.2	300.1	264.8	237.4	214.5	194.9	177.9	163.2	139.7	130.6	122.9	116.7	107.8	105.0	103.2	102.3	102.3
257.6	283.7	268.3	247.4	227.3	208.8	192.1	177.2	163.9	142.1	133.4	126.1	120.0	111.3	108.4	106.6	105.6	105.5
286.4	254.6	242.0	229.4	215.5	201.4	187.6	174.8	163.0	143.1	135.0	128.1	122.2	113.8	111.0	109.1	108.0	107.8
160.2	206.2	215.7	212.5	204.1	193.5	182.3	171.2	160.9	142.9	135.4	128.9	123.4	115.3	112.6	110.7	109.6	109.4
172.5	194.3	202.2	201.0	194.8	186.2	176.7	167.1	157.9	141.6	134.7	128.7	123.6	115.9	113.3	111.5	110.4	110.1
186.9	196.1	197.8	194.3	187.9	179.8	171.2	162.5	154.2	139.5	133.2	127.7	122.9	115.8	113.3	111.6	110.5	110.2
216.3	205.7	198.4	190.8	182.5	174.1	165.7	157.6	150.0	136.6	130.9	125.8	121.5	114.9	112.6	110.9	109.9	109.6
222.2	211.9	199.4	187.8	177.5	168.3	159.9	152.3	145.3	133.1	127.9	123.3	119.4	113.3	111.2	109.7	108.7	108.4
245.1	220.5	199.4	183.4	171.3	161.6	153.4	146.3	139.9	128.9	124.3	120.2	116.6	111.1	109.2	107.8	106.9	106.6
274.1	225.6	194.3	175.3	162.7	153.4	145.9	139.5	133.8	124.2	120.1	116.5	113.3	108.4	106.7	105.4	104.6	104.3
323.7	213.3	177.1	160.7	150.7	143.4	137.3	132.0	127.2	119.0	115.5	112.3	109.6	105.3	103.7	102.6	101.9	101.6
52.5	126.9	140.1	139.7	136.2	132.1	127.9	124.0	120.2	113.4	110.5	107.8	105.4	101.7	100.3	99.4	98.7	98.4
69.9	101.6	116.7	121.8	122.3	120.8	118.4	115.7	112.9	107.6	105.1	102.9	100.9	97.8	96.6	95.8	95.2	95.0
76.1	92.8	103.4	108.6	110.4	110.3	109.2	107.5	105.6	101.6	99.6	97.8	96.2	93.5	92.6	91.9	91.4	91.2
83.6	90.3	95.4	98.7	100.4	100.9	100.5	99.6	98.4	95.5	94.0	92.6	91.3	89.1	88.3	87.7	87.3	87.1
93.1	89.3	89.1	90.4	91.6	92.3	92.4	92.0	91.3	89.4	88.3	87.2	86.2	84.5	83.8	83.3	83.0	82.9
105.4	84.6	81.4	82.2	83.4	84.3	84.8	84.8	84.5	83.3	82.5	81.7	81.0	79.7	79.2	78.8	78.5	78.4
37.3	62.1	69.9	73.5	75.5	76.8	77.6	77.9	77.9	77.3	76.8	76.3	75.7	74.8	74.4	74.1	73.9	73.9
45.6	56.7	62.7	66.2	68.4	69.8	70.8	71.3	71.6	71.4	71.2	70.8	70.5	69.8	69.5	69.3	69.2	69.2
58.7	56.2	58.1	60.2	62.0	63.4	64.3	65.0	65.4	65.7	65.6	65.4	65.2	64.8	64.6	64.5	64.4	64.4
46.5	51.4	53.1	54.6	56.0	57.3	58.2	59.0	59.5	60.0	60.1	60.0	60.0	59.7	59.6	59.5	59.5	59.5
58.7	49.7	48.4	49.1	50.3	51.4	52.4	53.2	53.8	54.5	54.6	54.7	54.7	54.7	54.6	54.6	54.6	54.6
38.6	40.4	41.7	43.1	44.5	45.7	46.7	47.6	48.2	49.1	49.3	49.5	49.5	49.6	49.6	49.6	49.6	49.6
24.9	31.5	35.0	37.2	38.9	40.2	41.3	42.2	42.9	43.8	44.1	44.3	44.4	44.5	44.6	44.6	44.6	44.7
19.0	25.8	29.4	31.8	33.6	35.0	36.0	36.9	37.6	38.6	38.9	39.1	39.3	39.5	39.6	39.6	39.7	39.7
23.0	23.3	25.2	27.1	28.7	30.0	31.0	31.9	32.6	33.5	33.8	34.1	34.3	34.5	34.6	34.6	34.7	34.7
17.4	19.1	20.9	22.6	24.1	25.2	26.2	27.0	27.6	28.5	28.8	29.1	29.3	29.5	29.6	29.6	29.7	29.7
12.6	14.9	16.9	18.4	19.7	20.7	21.6	22.3	22.8	23.6	23.9	24.1	24.3	24.5	24.6	24.7	24.7	24.8
7.0	11.1	13.1	14.5	15.6	16.4	17.1	17.7	18.1	18.8	19.1	19.2	19.4	19.6	19.7	19.7	19.8	19.8
8.0	9.2	10.1	10.9	11.6	12.2	12.7	13.2	13.5	14.1	14.2	14.4	14.5	14.7	14.7	14.8	14.8	14.9
9.1	7.6	7.3	7.5	7.8	8.1	8.5	8.7	9.0	9.3	9.5	9.6	9.7	9.8	9.8	9.9	9.9	9.9
7.2	4.7	3.9	3.8	3.9	4.1	4.2	4.4	4.5	4.7	4.7	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9	4.9	5.0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

30	40	45	55	60	70	80	100	120	140	210	300	360	420	
41.6	50.4	55.5	67.0	74.0	83.1	93.5	118.2	135.7	155.2	229.3	306.4	347.7	371.2	332.9
51.9	60.3	65.5	78.0	85.8	95.1	105.8	132.3	149.3	168.6	243.8	314.9	353.1	384.1	393.8
61.4	69.6	74.9	87.9	96.1	105.6	116.6	143.7	160.5	179.6	253.9	323.0	365.9	418.3	486.7
70.1	78.1	83.4	96.7	105.1	114.7	125.7	152.9	169.4	188.1	259.8	325.3	368.9	436.7	594.5
78.0	85.8	91.1	104.4	112.7	122.3	133.3	160.0	176.1	194.2	262.3	319.2	347.8	365.0	321.5
85.1	92.7	97.8	110.9	119.1	128.5	139.3	165.2	180.7	198.1	262.3	313.7	338.0	354.2	352.1
91.4	98.6	103.5	116.3	124.3	133.4	143.8	168.8	183.5	200.0	260.5	310.1	336.3	361.8	388.7
96.7	103.6	108.3	120.6	128.3	137.1	147.0	170.7	184.6	200.1	256.9	305.9	335.1	368.1	401.9
101.3	107.7	112.2	123.9	131.2	139.6	149.0	171.3	184.2	198.6	251.0	298.3	330.2	373.5	434.5
104.9	110.9	115.1	126.2	133.1	141.0	149.8	170.5	182.5	195.6	242.5	284.3	313.8	361.3	468.4
107.8	113.3	117.3	127.7	134.1	141.4	149.6	168.7	179.6	191.4	232.1	263.4	279.4	289.4	257.6
109.8	114.9	118.6	128.2	134.2	141.0	148.6	166.0	175.9	186.4	220.7	242.5	251.1	259.2	286.4
111.1	115.7	119.1	128.0	133.5	139.8	146.7	162.6	171.5	180.8	209.6	223.4	223.2	210.0	160.2
111.6	115.8	118.9	127.1	132.2	137.9	144.2	158.6	166.5	174.9	199.8	210.0	208.4	197.4	172.5
111.4	115.2	118.1	125.5	130.1	135.3	141.1	154.1	161.2	168.7	191.3	201.9	203.0	198.8	186.9
110.6	114.1	116.6	123.4	127.6	132.2	137.4	149.1	155.6	162.4	183.7	197.1	202.7	207.9	216.3
109.3	112.3	114.6	120.7	124.5	128.7	133.3	143.8	149.6	155.8	176.4	193.1	203.0	213.8	222.2
107.4	110.1	112.1	117.6	120.9	124.7	128.8	138.1	143.3	148.8	168.5	188.0	202.5	222.1	245.1
105.0	107.4	109.2	114.0	117.0	120.3	123.9	132.1	136.7	141.5	159.3	179.1	197.0	226.9	274.1
102.1	104.2	105.9	110.1	112.7	115.6	118.7	125.8	129.7	133.8	148.4	164.0	179.3	214.4	323.7
98.9	100.8	102.2	105.9	108.1	110.6	113.3	119.3	122.5	125.8	136.3	142.5	142.0	127.8	52.5
95.4	97.0	98.2	101.4	103.3	105.4	107.7	112.6	115.2	117.7	124.4	124.2	118.3	102.4	69.9
91.6	92.9	94.0	96.6	98.3	100.0	101.9	105.9	107.8	109.7	113.4	110.6	104.7	93.5	76.1
87.5	88.6	89.5	91.8	93.1	94.5	96.1	99.1	100.6	101.9	103.5	100.4	96.5	90.8	83.6
83.2	84.2	84.9	86.7	87.8	89.0	90.2	92.5	93.5	94.3	94.6	91.8	90.1	89.8	93.1
78.7	79.5	80.1	81.6	82.5	83.4	84.3	86.0	86.6	87.1	86.2	83.4	82.3	85.0	105.4
74.1	74.8	75.3	76.5	77.1	77.8	78.5	79.6	80.0	80.1	78.4	74.5	70.6	62.5	37.3
69.4	69.9	70.3	71.2	71.8	72.3	72.7	73.4	73.5	73.4	71.2	67.1	63.3	57.0	45.6
64.5	65.0	65.3	66.0	66.4	66.7	67.0	67.3	67.3	67.0	64.5	61.0	58.6	56.5	58.7
59.7	60.0	60.3	60.8	61.0	61.3	61.4	61.4	61.3	60.9	58.3	55.3	53.6	51.6	46.5
54.7	55.0	55.2	55.6	55.7	55.8	55.9	55.7	55.4	54.9	52.3	49.7	48.8	49.9	58.7
49.8	50.0	50.1	50.4	50.4	50.5	50.5	50.1	49.7	49.2	46.4	43.6	42.0	40.5	38.6
44.8	45.0	45.0	45.2	45.2	45.2	45.1	44.7	44.2	43.7	40.8	37.6	35.2	31.6	24.9
39.8	39.9	40.0	40.0	40.0	40.0	39.8	39.3	38.9	38.3	35.5	32.2	29.7	25.9	19.0
34.8	34.9	34.9	34.9	34.9	34.8	34.7	34.1	33.7	33.1	30.4	27.3	25.4	23.4	23.0
29.8	29.9	29.9	29.9	29.8	29.7	29.6	29.0	28.6	28.1	25.6	22.8	21.1	19.2	17.4
24.8	24.9	24.9	24.8	24.8	24.7	24.5	24.0	23.7	23.2	21.0	18.6	17.0	15.0	12.6
19.9	19.9	19.9	19.8	19.8	19.7	19.5	19.1	18.8	18.4	16.6	14.6	13.2	11.1	7.0
14.9	14.9	14.9	14.9	14.8	14.7	14.6	14.3	14.0	13.7	12.4	11.0	10.2	9.2	8.0
9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.8	9.7	9.5	9.3	9.1	8.2	7.5	7.3	7.6	9.1
5.0	5.0	5.0	4.9	4.9	4.9	4.9	4.7	4.7	4.6	4.1	3.9	4.0	4.7	7.2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Nota. En la parte superior se coloca el tiempo de 0 a 420 minutos, en la parte inferior se coloca el tiempo en cero, en los extremos derecha e izquierda, se coloca el resultado de la infiltración en mm/h